

# 地盤振動問題に関する模型実験の相似則の検討

地盤工学研究室 VU VAN DUONG

指導教員

豊田浩史

## 1. はじめに

従来、列車が高架橋を走行する際に発生する振動は、列車の車両条件や速度などによって特徴的な周波数特性を有することが知られている。近年、鉄道の高速度による鉄道沿線に住む住民の振動問題が大きな課題となっている。振動に対する対策として、加振力の周波数特性を把握し、卓越する周波数帯で一定の効果が発揮される対策を選定することが効果的である。卓越周波数帯の振動をいかに低減できるかが、振動問題解決への大きな進展となる。

このような地盤振動問題を解決するために、様々な実験を行って検討している<sup>1)</sup>。その中で、地盤振動問題に関する模型実験においては、実物挙動を予測するためには、相似則が一つの大きな問題となる。そのため、本研究では、その相似則について検討を行う。

本研究では2つの相似則の検討を行う。1つ目の相似則(相似則①)においては、応力とせん断剛性  $G$  は同じ次元であるため、同じ相似比とできるかを検討する。この相似則は、過去の研究で土以外の材料(例えば寒天など)を使って検討を行った例がある。しかしながら、土は摩擦性材料であり、深いほど大きなせん断剛性となることが満たせていないこと、また土のような粒状材料と同じエネルギー減衰であるのかには疑問が残る。

そこで、今回の実験では、土材料である珪藻土を使って検討を行う。珪藻土は、藻類の一種である珪藻の殻の化石よりなる堆積物であり、大きな空隙(多孔質)を有する。今回使用した珪藻土の粒径加積曲線を図-1に示す。細粒分で構成されているが、非塑性である。土粒子密度は、 $2.26\text{g/cm}^3$  と、通常の土より小さいのが特徴である。

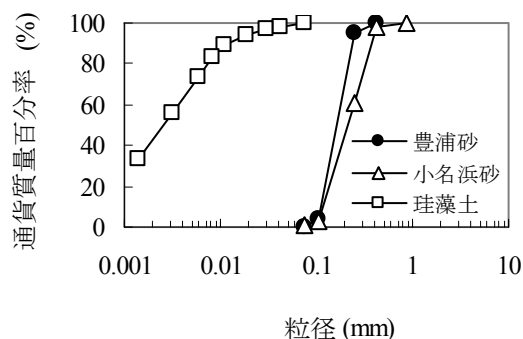


図-1 使用材料の粒径加積曲線

本研究では、相似則①について 1/10 模型の場合、模型のせん断剛性も 1/10 となるかを検討する。そこで、せん断剛性  $G$  とせん断波速度  $V_s$  の関係( $G = \rho V_s^2$ )により、模型の  $V_s$  が 1/3.2 とできるかについて検討する。

2つ目の相似則(相似則②)は実物と同じ土(今回は砂)を用いるとすると、模型のせん断剛性  $G$  はいくつになるのかを検討する。過去の研究(香川<sup>2)</sup>と國生・岩楯<sup>3)</sup>)により、三軸試験結果より、 $G$  は模型サイズの 1/2 乗に比例する実験則を適用すべきであることが指摘されている。ただし、通常の三軸試験の拘束圧は、土被りにすると 2m 以上の高拘束圧下となっている。そこで、小型土槽実験のように、土被り数 cm でも、この実験則が成立するかを確認する。なお、せん断剛性  $G$  とせん断波速度  $V_s$  の関係( $G = \rho V_s^2$ )により、 $V_s$  は 1/4 乗と比例することを調べる(ここでは、 $V_s$  の 1/4 乗則と称する)。実験は模型地盤内で、ベンダエレメント(BE)法と板叩き法で  $V_s$  (せん断波速度)の測定を行い、超低拘束圧でもその 1/4 乗則が成り立つかを確認し、相似則の妥当性を示すことが本研究の目的である。

## 2. 相似則①の検討

この相似則を検討するために、珪藻土を使って三軸 BE 試験を行った。BE 試験は、供試体にせん断波を入力し、伝播時間を測定することで、伝播距離からせん断波速度  $V_s$  を計算する試験である。せん断波速度  $V_s$  は、以下の式で示される<sup>4)</sup>。

$$V_s = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

ここで、

$\Delta L$  : 波の伝播距離 (m)

$\Delta t$  : 波の到達時間 (sec)

図-2 に BE 試験における伝播距離、図-3 に波の到達時間の算出方法をそれぞれ示した。波の伝播距離は、BE の先端間距離とした。(tip-to-tip 法) 伝播時間は、送信波と受信波の立ち上がり点の時間幅とした。(start-to-start 法)

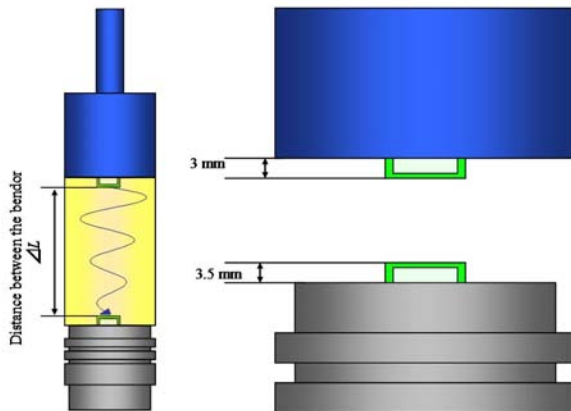


図-2 波の伝播距離

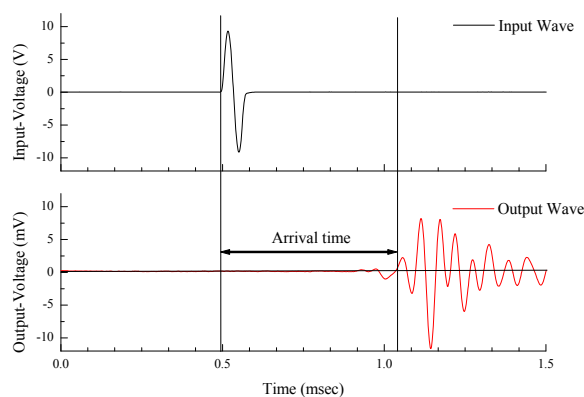


図-3 波の伝播時間

三軸供試体は、45%含水比の珪藻土を10層で突固めて、所定の密度（乾燥密度  $0.4\text{g/cm}^3$ 、間隙比 4.65）に調整した。図-4 は小名浜砂と珪藻土の測定  $V_s$  結果を表す。

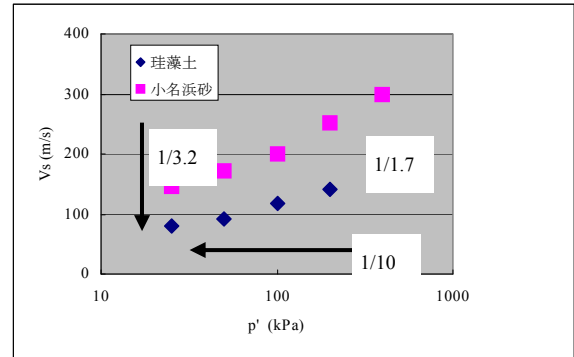


図-4 小名浜砂と珪藻土の  $V_s$  と拘束圧の関係

この結果により珪藻土は、通常の土と同様な拘束圧依存性を有することがわかる。また、通常の砂と比べ、同じ拘束圧で、 $V_s$  は約 1/1.7 となっている。そのため、例えば、実物が小名浜砂であり、1/10 模型を珪藻土で作製するとすれば、模型地盤の  $V_s$  を 1/3.2 程度にできる可能性が確認できた。しかし、珪藻土は高価であるため、大型実験では不向きであるというデメリットがある。

## 3. 相似則②の検討

$V_s$  を測定するために、本実験は土槽で2つ方法（BE法と板叩き法）を用いた。実験には小名浜を用いた。地盤の均等性を保つために、各層密度管理を行い、小名浜砂の相対密度を60%とした。

### 3.1 BE法による $V_s$ 測定と結果

BEは、発振部分と受振部分2つの部分から構成されている。発振部分が振動することにより、せん断波を発生させ、離れた受振部分でその波を感知する。そのため、発振部分から受振までの、波の到達時間を測定できる。土槽に設置するベンダエレメント間の距離が分かれば、せん断波速度が計算可能である。図-5のよう

に、本実験では土槽でベンダエレメントを3箇所の深さ(表面から5cm, 10cm, 20cmのところ)に設置した。

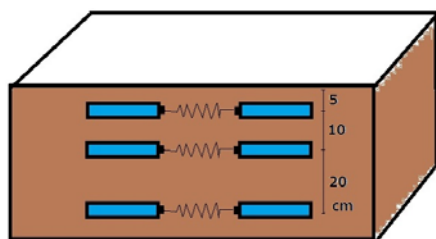


図-5 ベンダエレメントの設置

図-6 はベンダエレメント方法で  $V_s$  を測定した結果である。このグラフの縦軸はせん断波速度で、横軸は拘束圧を表す。この結果によりせん断波速度と拘束圧の関係は

$$V_s = 52.5p^{0.33}$$

になる。この結果は1/4乗則 ( $V_s=Ap^{0.25}$ ) に近い結果となっていることがわかる。このように、BE法による低拘束圧下での  $V_s$  の1/4乗則を確認できた。

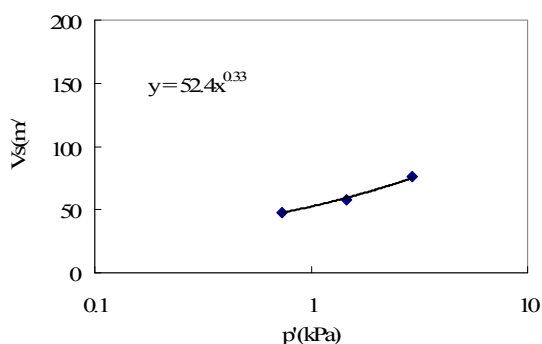


図-6 BE法により  $V_s$  と拘束圧の関係

### 3.2 板叩き法によるせん断波速度測定と結果

板叩き法では土槽の表面に丸金属版を設置する。この金属版に錘を衝突させ、振動を起こす。振り子を使った打撃による  $x, y$  方向加振と重錘落下による  $z$  方向加振がある。

図-7 に示すように、加速度計自体は地面から0cm, 5cm, 10cm, 20cmのところのところに配置した。加速度計には、地盤との固定をよくするため、4cmのスパイクが付けられており、このスパイ

クの中心深さを加速度計深さとした。地面の深さ方向に4つ加速度計があるが、同じ深さに設置された加速度計で、金属版から振動が、左から右の加速度計に到達する時間を波の立ち上がりで計測する。対とした加速度計の到達時間の差と距離が分かればせん断波速度を計算できる。

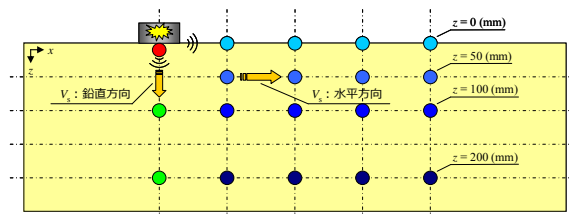


図-7 加速度計の配置

振り子を使った打撃による  $x, y$  方向加振では、せん断波速度は図-8 のようになる。この結果によりせん断波速度と拘束圧の関係は

$$V_s = 95.98p^{0.34}$$

になり、1/4乗則 ( $V_s=Ap^{0.25}$ ) に近い結果となることがわかる。この結果より、板叩き法による低拘束圧下での  $V_s$  の1/4乗則を確認できた。

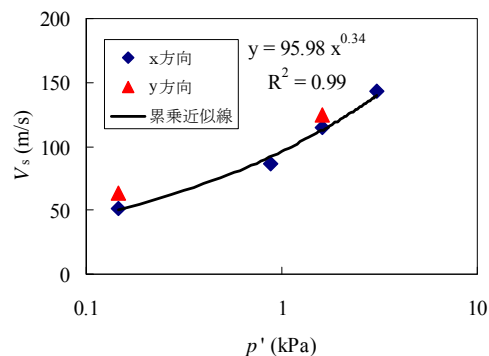


図-8  $x, y$  加振方向  $V_s$  と拘束圧関係

板叩き法では  $x, y$  方向加振で  $V_s$  の1/4乗則を確認できたが、 $z$  方向加振は図-9 のようになった。 $z$  方向加振では、 $V_s$  は拘束圧に依存しておらず、一定と見られる。これは、 $z$  方向加振では、波の立ち上がり点を見るだけでは、 $V_s$  の拘束圧依存性を示せず、周波数分析による表面波としての解析が必要と考えられる。

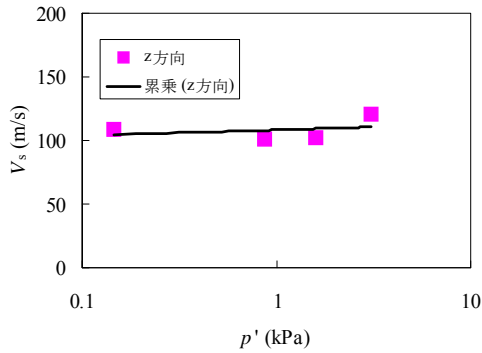


図-9 z 加振方向  $V_s$  と拘束圧関係

### 3.3 土槽実験と三軸試験によるせん断波速度測定結果

ここでは、土槽実験と三軸試験のせん断波速度  $V_s$  測定結果を同時に並べて比較する。この結果を図-11 に示す。

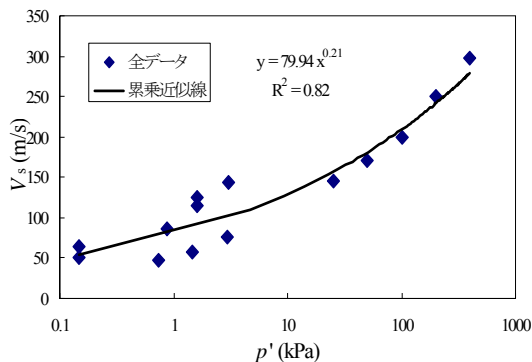


図-11 土槽実験と三軸試験による  $V_s$  の結果

この結果によりせん断波速度と拘束圧の関係は

$$V_s = 79.94p'^{0.21}$$

になり、1/4 乗則 ( $V_s = Ap'^{0.25}$ ) に近い結果となっていることがわかる。また、低拘束圧に位置する土槽実験の結果のみ比較すると、板叩き法で得られたせん断波速度は、BE で得られたせん断波速度より大きくなっていることがわかる。測定方法による差はあるものの、これらの結果より、土槽実験においての、 $V_s$  の 1/4 乗則を適用できることが確認できた。

## 4. 結論

本実験では、地盤振動問題に関する模型実験の相似則の検討として、2つの相似則を検討した結果、次のことが確認できた。

- ・珪藻土を用いれば、地盤のせん断剛性を低下させた模型地盤の作製が可能であることを示した。ただし、純度の高い珪藻土は高価であるため、大型実験は適用することは難しい。
- ・ $V_s$  の 1/4 乗則が、数 cm の土被り地盤（超低拘束圧）においても適用可能であることを示した。

今後、 $V_s$  の 1/4 乗則を用いた相似則に基づき、地盤の振動模型実験を行っていく。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：地盤震動—現象と理論，pp.326-44，2005.
- 2) 香川崇章：土木構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文集，No.275，pp.69-77，1978.
- 3) 國生剛治，岩楯敏広：軟弱地盤の非線形振動特性についての模型振動実験と解析，土木学会論文集，No. 285，pp. 57-67，1979.
- 4) 小形正男:振動・波動 (裳華房テキストシリーズ—物理学)，裳華房,pp.87-157，1999.